环境试验与观测

杭州湾沿岸大气中氯离子沉积速率检测与影响研究

王建乐[1]，蒋达飞[1]，李国杰[1]，徐强[2*]，赵国栋[1]，张紫薇[1]，程万里[1]
（1.中核核电运行管理有限公司，浙江 嘉兴 314300；2.浙江大学 海洋研究院，浙江 舟山 316021）

摘要：目的 探究杭州湾沿岸工程设施的腐蚀严酷度水平。**方法** 选择 3 个临水检测点开展为期 1 a 的大气氯离子沉积速率检测，并分析季节、风向、方位、降雨量等对氯离子沉积速率的影响。**结果** 3 个检测点的年均沉积速率都超过 3 mg/(m^2·d)。B 检测点因方位、周围空间等原因，造成全年受到东部海洋大气的作用最为显著，氯离子沉积速率全年最高，其中 7 月份的氯离子沉积速率水平接近海南省中东部离海岸线 350 m 处夏季水平。由于 6 月份降雨量比 5 月份增大了 2.3 倍，B 检测点 6 月份氯离子沉积速率比 5 月下降了 51%。B 检测点附近服役 15 a 以上混凝土中，氯离子含量整体非常高，呈现典型的海洋腐蚀特征。**结论** 杭州湾沿岸大气符合海洋腐蚀环境特征，并且受到季节、风向、方位和降雨量等因素的影响。

关键词：氯离子沉积速率；杭州湾沿岸；混凝土氯离子含量；风向；降雨量；海洋腐蚀
中图分类号：TG172 **文献标志码：**A **文章编号：**1672-9242(2024)06-0136-06
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2024.06.018

Detection and Impact of Chloride Ion Deposition Rate in the Atmosphere at the Coast of Hangzhou Bay

WANG Jianle[1], *JIANG Dafei*[1], *LI Guojie*[1], *XU Qiang*[2*], *ZHAO Guodong*[1], *ZHANG Ziwei*[1], *CHENG Wanli*[1]
(1. CNNP Nuclear Power Operations Management Co., Ltd.,, Zhejiang Jiaxing 314300, China;
2. Ocean Academy, Zhejiang University, Zhejiang Zhoushan 316021, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the corrosion level of construction facilities at the coast of Hangzhou Bay. Three coastal points were selected for one-year detection of the chloride ion deposition rate, and the effects of season, wind direction, orientation and rainfall on the deposition rate of chloride ions were analyzed. The average annual chloride deposition rate at the three detection points exceeded mg/(m^2·d). Due to factors such as orientation and surrounding space, point B was most heavily affected by the atmosphere of the eastern ocean throughout the year, and the chloride ion deposition rate was the highest throughout the year. Among them, the chloride ion deposition rate in July was close to chloride deposition rate monitored 350 m away from the coastline in the Middle East of Hainan Province. Since the rainfall in June increased by 2.3 times compared to that in May, the chloride ion deposition rate at point B decreased by 51% in June compared to that in May. The chloride ion content in concrete of more than 15 years was generally high, showing typical marine corrosion characteristics. The atmosphere at the coast of Hangzhou Bay conforms to the characteristics of marine corrosion environment and is affected by factors such as

收稿日期：2024-02-22；**修订日期：**2024-03-18
Received：2024-02-22；**Revised：**2024-03-18
引文格式：王建乐，蒋达飞，李国杰，等. 杭州湾沿岸大气中氯离子沉积速率检测与影响研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(6): 136-141.
WANG Jianle, JIANG Dafei, LI Guojie, et al. Detection and Impact of Chloride Ion Deposition Rate in the Atmosphere at the Coast of Hangzhou Bay[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(6): 136-141.
*通信作者（Corresponding author）

season, wind direction, orientation, and rainfall.

KEY WORDS: chlorine ion deposition rate; coast of Hangzhou Bay; chloride ion content in concrete; wind direction; rainfall; marine corrosion

世界上约 40%的人口生活在海岸线 100 km 以内，沿岸建造了大量的工程设施及建筑物[1]。蓬勃发展的海洋经济已成为中国经济和社会发展的新亮点[2]，大量跨海大桥、码头、隧道以及滨海建筑物的安全显得非常重要[3]。然而，高盐、高湿、高温、强腐蚀等海洋环境特征容易引起材料的性能退化[4]，导致金属腐蚀和混凝土结构被破坏[5]。从大气区工程设施的腐蚀影响来看，需要优先考虑海洋大气中氯盐的分布。大气中的氯盐颗粒主要来自波浪和气流的冲击[6]，往往随着海洋大气的运动沉积在材料表面[7]，因此氯离子沉积速率也常被用来表征海洋大气环境腐蚀严酷度的重要指标[8]。

杭州湾是钱塘江与东海的过渡段，平面呈典型的喇叭状，其中钱塘江河口区域盐度仅约 0.5%~1%[9-10]。按传统的海水生成大气中氯盐理论来分析，杭州湾沿岸近似为内陆环境，其大气中氯离子沉积速率水平应在 1 mg/(m^2·d)以内[11]，甚至可推测该区域工程设施应不存在海洋腐蚀。然而，在实际调研中发现，部分沿岸工程设施表层混凝土已出现锈胀裂缝等海洋腐蚀特征[12]。为了探究杭州湾沿岸工程设施的腐蚀严酷度水平，本文选择了氯离子沉积速率作为定量指标，沿岸设立 3 个临水检测点，开展了为期 1 a 的氯离子沉积速率检测，并结合检测点附近气象数据进一步分析季节、风向、降水、位置等对氯离子沉积速率的影响。

1　试验

1.1　大气中氯离子沉积速率检测

1）检测点。对杭州湾沿岸进行现场调研，考虑地理位置和腐蚀严重程度等因素，选择杭州湾钱塘江口北岸某山体区域，分别在山体西北、东南、西南方向设置了 A、B 和 C 等 3 个检测点，如图 1 所示。A 点与 C 点间隔约 1 km，A 点与 B 点间隔约 2.2 km，B 点与 C 点间隔约 1.9 km。各检测点周围无明显阻挡物，离水线距离基本接近，受海水腐蚀作用比较接近。

2）氯离子沉积速率检测。参考 GB/T 19292.3—2018，采用挂片法检测空气中氯离子的沉积速率。采样周期一般为 1 个自然月，每个月月初取换样 1 次，每次在各检测点放置 3 个平行挂样[13]。利用离子色谱仪测定氯离子浓度，计算获得杭州湾沿岸检测点空气中月均氯离子沉积率。采样时间从 2023 年 1 月到 2024 年 1 月，共计 12 个月。

3）基本气象数据。利用杭州湾沿岸检测点附近现有气象站，同时记录温度、风速、降雨等气象数据，总结计算出采样月平均温度、月平均风速、降雨量等数据。杭州湾检测点采样期间基本气象数据见表 1。可以看出，采样周期内，月均最高温为 30.1 ℃，月均最大风速为 4.31 m/s，均出现在 2023 年 7 月。月最大降雨量为 193.3 mm，出现在 2023 年 6 月。

图 1　杭州湾沿岸检测点位置
Fig.1 Location of detection points along the coast of Hangzhou Bay

表 1　杭州湾检测点基本气象数据
Tab.1 Basic meteorological data of detection points in Hangzhou Bay

采集时间	月平均温度/℃	月平均风速/(m·s^{-1})	降雨量/mm
2023 年 1 月	7.4	3.03	41.4
2023 年 2 月	7.8	3.04	76.8
2023 年 3 月	12.5	3.08	57.6
2023 年 4 月	17.1	3.58	63.3
2023 年 5 月	21.8	3.16	58.3
2023 年 6 月	26.1	3.32	193.3
2023 年 7 月	30.1	4.31	166.2
2023 年 8 月	28.9	3.27	162.1
2023 年 9 月	26.6	3.08	33.3
2023 年 10 月	21.1	2.88	8.1
2023 年 11 月	14.9	3.36	51.2
2023 年 12 月	8.4	3.05	56.6

1.2　混凝土样品氯离子含量测试

对杭州湾沿岸 B 检测点附近某工程服役 15 a 以上混凝土进行现场采样（如图 2 所示），并用混凝土磨粉机从外到内进行不同深度的取样，采用 DY-2501B 型氯测试仪（如图 3 所示）测量混凝土中

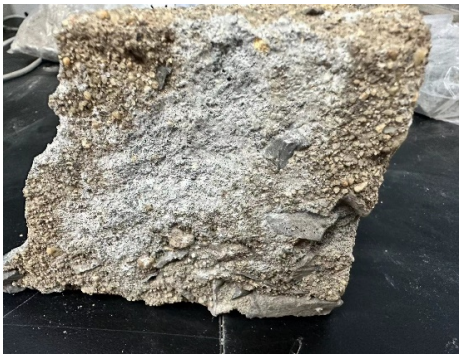

图 2　受氯盐侵蚀混凝土
Fig.2 Concrete corroded by chloride salts

图 3　DY-2501B 型氯测试仪
Fig.3 DY-2501B chlorine tester

的氯离子含量。

2　结果与讨论

2.1　全年氯离子沉积速率数据

A、B、C 检测点为期 12 个月的氯离子沉积速率数据如图 4 所示。可以看出，各检测点不同月份氯离子沉积速率存在明显差异。受高温、风速等因素的共同作用[14]，B 检测点在 7 月份的氯离子沉积速率为 29.63 mg/(m^2·d)，接近海南省中东部离海岸线 350 m 处夏季水平[15]和广西北海市距海岸线 100 m 年均水平[16]。可以认为此时 B 检测点附近环境已属于典型的海洋腐蚀环境，会对工程材料及设施造成海洋腐蚀。然而在 12 月，B 检测点氯离子沉积速率为 4.77 mg/(m^2·d)，仅为 7 月氯离子沉积速率的 16%，此时对工程材料及设施的腐蚀性较低。

从图 4 中还可以看出，B 检测点氯离子沉积速率普遍高于 A、C 检测点。由于地理位置不同等引起的空气流通能力差异，B 检测点的氯离子沉积速率全年都最高，部分月份甚至是 C 检测点的 3 倍以上。3 个检测点的年均沉积速率都超过 3 mg/(m^2·d)，都属于 S1 的污染等级[17]。综合来看，尽管杭州湾沿岸大气氯离子沉积速率低于东海摘箬山岛的沉积速率[18]，但仍符合海洋腐蚀环境特征[13,19]，需要对该区域长期服

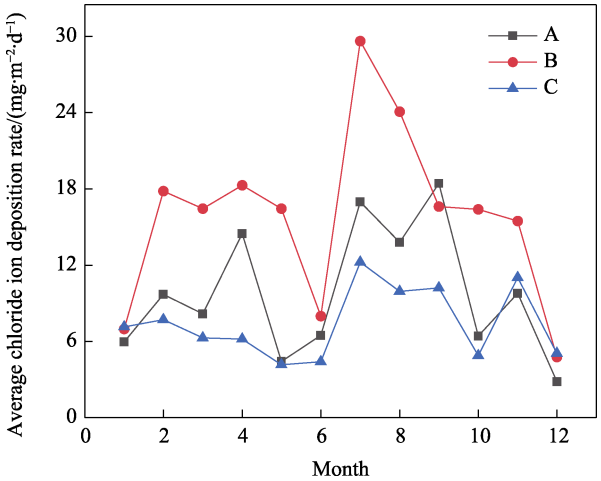

图 4　3 个检测点不同月份氯离子沉积速率
Fig.4 Chlorine ion deposition rates in different months at three detection points

役的工程设施或装备采取专门的海洋防腐措施。

2.2　风向对氯离子沉积速率影响

为了研究风向对氯离子沉积速率的影响，统计了 1—12 月的平均风向，如图 5 所示。可以看出，全年风向基本在 140°~210°，以东南风为主。整体来看，B 检测点的氯离子沉积速率明显受到季风的影响。在刮西北风的 12 月，B 检测点的氯离子沉积速率全年最低。

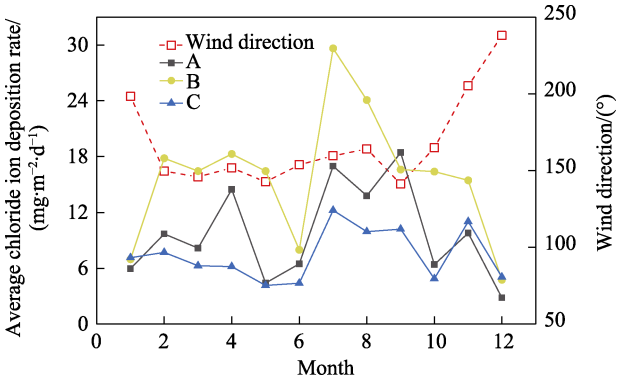

图 5　氯离子沉积速率与风向的关系
Fig.5 Relationship between chloride ion deposition rate and wind direction

另外，3 个检测点氯离子沉积速率的整体大小体现了干片法测量结果与风通量的较强关联性。尽管相距仅为约 2.2 km，山体明显影响了不同检测点的风通量。A 检测点位于山体西北方向，受到富含氯离子的东南季风作用有限，造成氯离子沉积速率低于 B 检测点；C 检测点尽管位于山体东南方向，但由于背后山体阻挡，致使风通量有限，使得全年氯离子沉积速率较低；B 检测点位于山体西南方向，方便东南海风吹入，且周围没有山体阻碍，全年受到海洋大气作用最为充足，致使 B 检测点的氯离子沉积速率全年最高。

2.3　季节对氯离子沉积量影响

为了研究氯离子沉积速率与不同季节的关系，根据表 1 将四季划分为：春季（2 月、3 月和 4 月）、夏季（5 月、6 月和 7 月）、秋季（8 月、9 月和 10 月）、冬季（11 月、12 月和 1 月）。将四季氯离子沉积速率转化为氯离子沉积量，如图 6 所示。可以看出，各检测点的氯离子沉积量都呈现出冬季最低的特征。

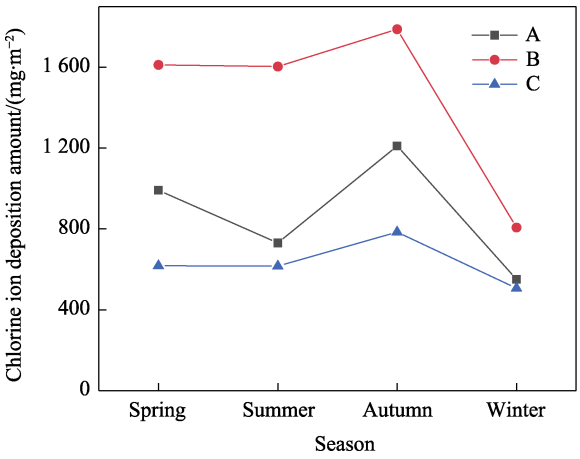

图 6　3 个检测点不同季节氯离子沉积量

Fig.6 Chlorine ion deposition amount in different seasons at three detection points

在空气中氯盐产生充分的海岛环境，常出现明显的氯离子沉积量“夏低冬高”的规律[1,18]，这主要受到温度和降雨等影响。然后在空气中氯盐产生不充分的区域，比如陆地或大岛的滨海地区，其氯离子沉积量明显受到季风的影响[20]。杭州湾沿岸地区冬季刮北风，没有足够氯盐输入，使得该地区氯离子沉积量大幅最低。B 检测点冬季氯离子沉积量为 807.2 mg/m^2，比秋季（1 788.2 mg/m^2）下降了约 55%。在全年累计方面，尽管相距 1.9 km，B 检测点全年氯离子沉积量为 5807.3 mg/m^2，高出 C 检测点（2 687.5 mg/m^2）1 倍以上。

2.4　降雨量对氯离子沉积速率影响

为了进一步研究降雨对氯离子沉积速率的影响，选取了风速、风向几乎相同的 2—6 月的数据进行对比分析，氯离子沉积速率与降雨量的关系如图 7 所示。可以看出，受江南地区梅雨等影响，6 月份降雨量（193.3 mm）比 5 月份（58.3 mm）增大了 2.3 倍，致使 B 检测点 6 月份的氯离子沉积速率比 5 月下降了 51%。A 检测点和 C 检测点的氯离子沉积速率处于较低水平，6 月降雨对其影响较小。

2.5　混凝土样品中氯离子含量

为了验证上述海洋大气腐蚀环境，对 B 检测点服役混凝土进行不同深度的氯离子含量检测。从表 2 中可以看出，混凝土中氯离子含量整体非常高，由外向

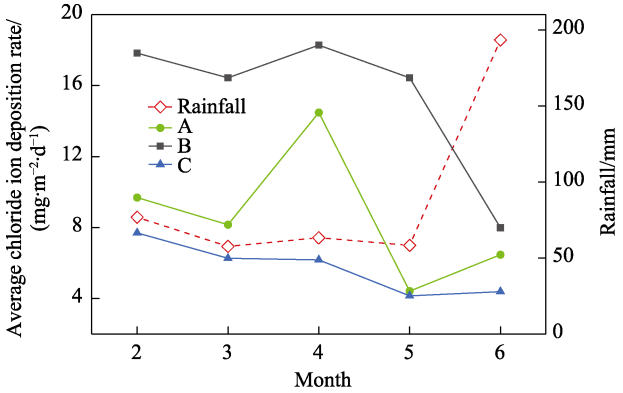

图 7　氯离子沉积速率与降雨量的关系

Fig.7 Relationship between chloride ion deposition rates and rainfall

表 2　受氯盐侵蚀混凝土氯离子含量

Tab.2 Content of chloride ions in concrete corroded by chloride salts

取样深度/mm	氯离子质量分数/%
0~2	0.222 1
2~4	0.254 1
4~6	0.194 2
6~8	0.132 1

内降低，呈现典型的海洋腐蚀特征，进一步验证了杭州湾沿海也处于氯离子腐蚀大气环境。通过计算可以得出，距混凝土表面 0~8 mm 处，氯离子的平均质量分数约 0.20%，已接近杭州湾北岸某码头海水作用 7 a 表层混凝土的氯离子含量[21]，远超常规的钢筋表面临界氯离子浓度限，易引起保护层厚度不足部位的钢筋快速锈蚀、开裂[22]。

当空气中的氯离子沉积在材料表面，会引起金属材料锈蚀，也会渗入混凝土内，引起钢筋锈蚀[23]。尽管检测点附近水域在空气中产生的氯盐较低，杭州湾沿岸陆上工程设施长期受到东部海洋大气中氯离子侵蚀是作用。当累计作用超过 10 a，海洋大气中氯离子周期性侵蚀作用显得很严重，造成杭州湾沿岸工程设施东南部位呈现典型的海洋腐蚀特征。因此，杭州湾沿岸工程设施在建设时，应完善海洋环境耐久性指标[24]，在日常维护时，也应相应增加海洋防腐成本。

3　结论

1）3 个检测点的年均沉积速率都超过 3 mg/(m^2·d)，都属于 S1 的污染等级。杭州湾沿岸大气氯离子沉积速率尽管低于东海摘箬山岛的沉积速率，仍符合海洋腐蚀环境特征。

2）B 检测点位于西南方向，受东南海风影响，全年受到海洋大气的作用最为显著，氯离子沉积速率全年最高，其中 7 月份的氯离子沉积速率已接近了海南省中东部离海岸线 350 m 处夏季水平。

3）各检测点的氯离子沉积量都呈现出冬季最低趋势，这与测试点的季风和降雨情况有关。

4）在风速、风向接近相同时，各检测点的氯离子沉积速率明显受到降雨量的影响。当 6 月份降雨量比 5 月份增大 2.3 倍，B 检测点 6 月份的氯离子沉积速率比 5 月下降了 51%。

5）B 检测点附近服役 15 a 以上混凝土中氯离子含量整体非常高，由外向内降低，呈现典型的海洋腐蚀特征，验证了该检测点为氯离子腐蚀大气环境。

参考文献：

[1] 胡劲哲. 海洋大气区混凝土表层氯离子沉积规律研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
HU J Z. Study on the Law of Chloride Ion Deposition on Concrete Surface in Marine Atmospheric Area[D].Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2021.

[2] 刘曙光, 黄悦, 尚英仕. 中国海洋经济高质量发展耦合协调度及其区域差异性研究[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(10): 3-11.
LIU S G, HUANG Y, SHANG Y S. The Coupling Coordination Degree and Regional Difference of High-Quality Development of China's Marine Economy[J]. Ocean Development and Management, 2023, 40(10): 3-11.

[3] 侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(6): 601-609.
HOU B R, LU D Z. Corrosion Cost and Preventive Strategies in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(6): 601-609.

[4] 陈新彦, 陈大明, 陈旭, 等. 热带海洋大气环境中耐候钢腐蚀特征与机理的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(2): 150-156.
CHEN X Y, CHEN D M, CHEN X, et al. Corrosion-Characteristics And-Mechanism of Weathering Steel Q345 in Tropical Marine Atmosphere[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(2): 150-156.

[5] 杨蓝蓝. 结构混凝土钢筋腐蚀评价方法及防腐技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
YANG L L. The Research on Evaluation of Steel Corrosion and Technology of Anti-Corrosion for Reinforced Concrete[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

[6] 刘俊珺, 张志训, 武占海. 大气环境对风电机组腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(6): 480-483.
LIU J J, ZHANG Z X, WU Z H. Effects of Atmospheric Environment on Corrosion of Wind Turbines[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(6): 480-483.

[7] 张菲菲. 深圳滨海建筑物表层氯离子沉积规律研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
ZHANG F F. Study on the Law of Chloride Ion Deposition on the Surface of Coastal Buildings in Shenzhen[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.

[8] 覃粒, 吴德权, 胡涛, 等. 海南湿热海洋大气环境Q235钢腐蚀行为研究及严酷度评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 90-97.
QIN L, WU D Q, HU T, et al. Corrosion Behaviors of Q235 Steel and Severity Evaluation for Humid and Hot Marine Atmosphere Environmental in Hainan[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 90-97.

[9] 章洁, 卢勇, 张红武. 钱塘江河口盐水入侵二维数值模型研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2016, 28(4): 14-18.
ZHANG J, LU Y, ZHANG H W. 2D Numerical Simulation on Saltwater Intrusion in the Qiantang Estuary[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2016, 28(4): 14-18.

[10] 邹志年, 沈永明. 钱塘江河口围涂工程对杭州湾水动力和水环境的影响[J]. 水运工程, 2017(1): 26-33.
ZOU Z N, SHEN Y M. Influence of the Reclamation Project at Qiantang Estuary on the Hydrodynamics and Water Environment in Hangzhou Bay[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(1): 26-33.

[11] 刘聪, 唐其环, 王莞, 等. ISO 9223—2012 标准碳钢大气腐蚀速率预测方程在我国典型地区的适用性研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(10): 74-77.
LIU C, TANG Q H, WANG W, et al. Applicability of Atmospheric Corrosion Rate Prediction Equation for Carbon Steel of Standard ISO 9223—2012 in Typical Areas of China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(10): 74-77.

[12] 高祥杰. 海港码头氯离子侵蚀混凝土实测分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
GAO X J. Study on Chloride Penetration of In-Situ Harbor Structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[13] 王浩, 丁国清, 刘凯吉, 等. 我国不同海域的大气腐蚀环境评估[J]. 环境技术, 2022, 40(1): 22-26.
WANG H, DING G Q, LIU K J, et al. Environmental Assessment of Atmospheric Corrosion in Different Sea Areas of China[J]. Environmental Technology, 2022, 40(1): 22-26.

[14] 张涛, 李鸿飞, 刘静, 等. 濒海大气环境氯离子高度分布规律研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 137-142.
ZHANG T, LI H F, LIU J, et al. Height Distribution Law of Chlorine Ions in Coastal Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 137-142.

[15] 郭赞洪, 梁少燕, 唐其环, 等. 空气中氯离子沉积速率的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 124-130.
GUO Z H, LIANG S Y, TANG Q H, et al. Analysis of Factors Influencing Chloride Deposition Rate in Air[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 124-130.

[16] 李文翰, 郑鹏华, 彭敦诚, 等. 广西工业与沿海地区Q235 碳钢的早期大气腐蚀研究[J]. 材料保护, 2020, 53(6): 18-26.
LI W H, ZHENG P H, PENG D C, et al. Early Atmospheric Corrosion Behavior of Q235 Carbon Steel in In-

dustry and Coastal Areas of Guangxi[J]. Materials Protection, 2020, 53(6): 18-26.

[17] 国家市场监督管理总局. 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 第 1 部分: 分类、测定和评估: GB/T 19292.1—2018[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2018.
State Administration for Market Regulation. Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres: Part 1: Classification, Determination and Estimation: GB/T 19292.1—2018[S]. Beijing: Standardization Administration, 2018.

[18] 何筠青, 李元贝, 许华涛, 等. 东海海岛大气环境中氯离子沉积速率检测与影响分析[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(5): 699-702.
HE Y Q, LI Y B, XU H T, et al. Detection and Effect Analysis of Chloride Ion Deposition Rate in the Atmospheric Environment of Island in the East China Sea[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 41(5): 699-702.

[19] 刘军, 邢锋, 丁铸. 沿海大气氯离子在混凝土结构的累计沉积量研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(3): 32-34.
LIU J, XING F, DING Z. The Accumulation Deposition of Atmospheric Chloride Ion in Concrete Structure[J]. Building Science, 2009, 25(3): 32-34.

[20] 贺琼瑶, 吴遥, 刘聪, 等. 海洋大气环境下 Q235 钢表面氯离子沉积量分布规律研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 158-165.
HE Q Y, WU Y, LIU C, et al. Distribution Law of Chloride Ion Deposition on the Surface of Q235 Steel under Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 158-165.

[21] 赵羽习, 高祥杰, 许晨, 等. 海港码头混凝土表面氯离子质量分数随季节变化规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(11): 2120-2124.
ZHAO Y X, GAO X J, XU C, et al. Concrete Surface Chloride Ion Concentration Varying with Seasons in Marine Environment[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(11): 2120-2124.

[22] 胡劲哲, 牛建刚, 孙丛涛, 等. 海洋大气区氯离子在混凝土中的沉积与传输行为研究综述[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 165-178.
HU J Z, NIU J G, SUN C T, et al. A Review on the Deposition and Transport Behavior of Chloride Ions in Concrete in Marine Atmosphere[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 165-178.

[23] 修建得, 金祖权, 李宁, 等. 海洋盐雾环境下混凝土中氯离子传输研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(3): 771-785.
XIU J D, JIN Z Q, LI N, et al. Research Progress of Chloride Ion Transport in Concrete under Marine Salt Spray Environment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(3): 771-785.

[24] 徐强, 李锋, 乐勇, 等. 大掺量掺合料对海工混凝土耐久性的影响及工程实证[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(12): 1-3.
XU Q, LI F, LE Y, et al. Influence and Construction Verification on the Durability of Marine Concrete with Large Amount of Admixtures[J]. New Building Materials, 2022, 49(12): 1-3.